Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 2, 2023. (97-106)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Optimization of Dimensional Accuracy of Mold Steel in Wirecut Process based on Response Surface Method

Research Article

Masoud Seydi[1], Farshad Rabiei[2], Zahra Seydi[3]

DOI:

1. Introduction

Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) is an electrothermal process that uses a conductive wire with a diameter of 0.05 to 0.30 mm as an electrode. The dielectric liquid is placed between the wire electrode and the workpiece in order to create a fixed gap of 10-100 micrometers. When sufficient voltage is applied, the dielectric liquid acts as an ionizing medium for the electrode. The workpiece is eroded due to the separate sparks that occur between the workpiece and the wire and is removed from the machining area by the dielectric fluid flow. Figure 1 shows the wirecut process schematic.

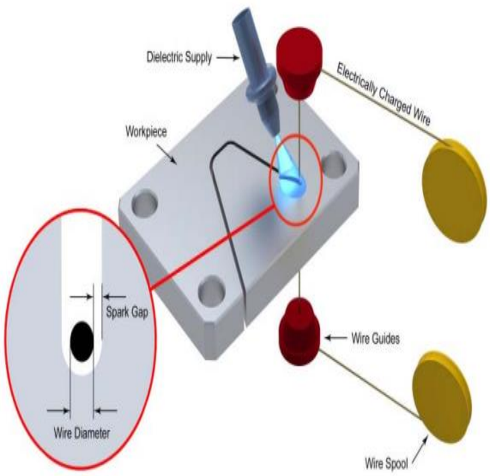


Figure 1. Schematic of the wirecut process

One of the advantages of this process is that the wire does not come into contact with the workpiece during the process, so the physical pressure similar to grinding and milling processes is not applied to the workpiece. This process eliminates mechanical stress, noise, and vibration during machining and can produce various materials with a thickness of 300 mm. Wirecut is a suitable option for making molds and industrial parts due to its high dimensional accuracy and favorable surface quality. Proper dimensional accuracy leads to improvement of fatigue strength, wear resistance, and corrosion resistance; so any effort to improve dimensional accuracy in this process can be a big step in the direction of producing precise and strong industrial parts.

The performance of the wirecut machine depends completely on machining parameters. It is very difficult to obtain the relationship between machining parameters and machining characteristics in the wire cutting process due to the multitude of parameters of the work process.

Therefore, choosing the right machining parameters can lead the process to the desired dimensional accuracy. Response procedure method is a mathematical and statistical technique that is used to model and analyze problems, where the response is affected by several variables, and its purpose is to model and optimize this response.

Using response procedure method, this study tried to optimize the dimensional accuracy, which plays an essential role in determining the position of the wirecut process. Parameters “wire speed”, “wire tension”, and “generator power” were selected as input parameters in this process.

2. Laboratory conditions

Mo40 steel was used as the workpiece material. First, in order to achieve uniformity in thickness, the workpiece was completely planed using a lathe machine and brought to the final dimensions of 320 x 40 mm and a thickness of 10 mm. Then it was fixed on the CHARMILLES five-axis wirecut machine (Figure 2). Parameters “wire injection speed”, “wire tension” and “generator power” were selected as input parameters. Table 1 shows the range of these parameters.

* Manuscript received: January 9, 2022. Revised, January 22, 2022, Accepted, February 14, 2023.

[1] Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

[2.] Corresponding author. Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran.

Email: F.rabiei@ilam.ac.ir

[3] Master's Degree, Faculty of Energy, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

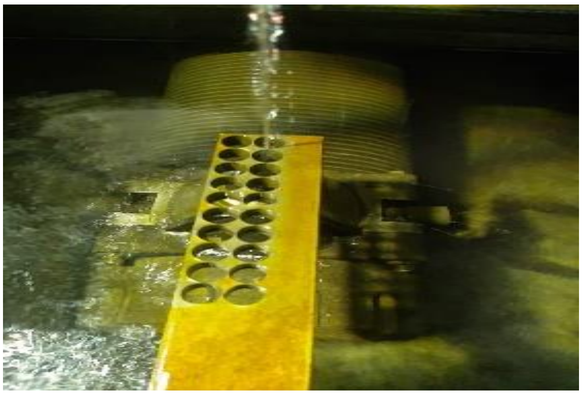


Figure 2. The five-axis wirecut machine and the work pieces on it

Table 1. Test conditions

Wire diameter (mm)	0.2
Wire material	Copper
Dielectric fluid	Distilled water
Wire injection speed (cm/s)	10-2
Wire tension (kg)	2.5-0.5
Generator power (percentage)	50-10

Wire speed and wire tension are parameters of wire movement control. The wire feeding speed indicates the length of the wire that is unrolled from the reel in a unit of time. Unnecessary increase of this parameter leads to an increase in wire consumption, on the other hand, being too low will lead to an increase in the possibility of wire breakage.

To create stable machining accuracy, a certain amount of tension in the wire is required to limit deviation of the path, bending, and vibration. In order to optimize the mentioned parameters using response procedure method, 20 experiments were performed according to Table 2. For each test, a cylinder with a base diameter of 10 mm and a height of 10 mm was cut from the workpiece.

Factors “traction”, “speed” and “power” are considered as input variables and dimensional accuracy is response variable. Building response procedure models in response procedure designs is an iterative process. As soon as an approximate model is obtained, it is tested by the goodness of fit method to see if the answer is satisfactory. If the answer is not confirmed, the estimation process starts again and more tests are performed. The relevant results are presented in the form of analysis of variance table. As can be seen, the P-value of the interaction between the factors is less than 0.05, and the validity of the model is confirmed.

Figure 3 shows the Pareto chart related to the impact of the main, reciprocal, and square parameters on the output parameter (dimensional accuracy). Based on this diagram, with a confidence factor of 0.95, the mutual impacts of the factors have the greatest impacts; BC: interaction of speed and power, AC: interaction of tension and power, and AB: interaction of tension and speed. In this graph, any bar that crosses the vertical line of 2.228 indicates that it affects the response variable. The mentioned number is calculated based on the confidence factor of 95%. The Pareto chart seeks to identify the factors whose total impact on the response variable constitutes more than 80% of the impacts. In other words, it seeks to determine 20% of the factors whose share in the changes of the response variable is 80%. In this research, the factors are: The interaction of speed and power, the interaction of tension and power, and the interaction of tension and speed.

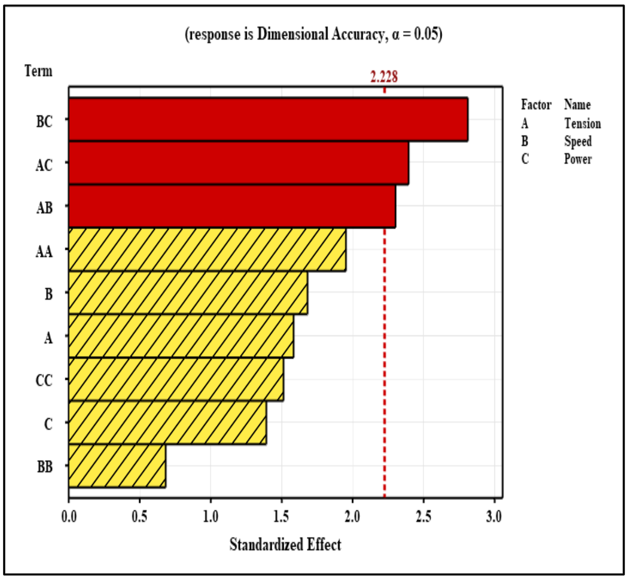


Figure 3. Pareto standard effects

3. Conclusion

Achieving high dimensional accuracy in making cutting molds is very important. Wirecut process is one of the common processes for making these molds. This study tried to analyze, model, and optimize the value of dimensional accuracy based on wire speed, wire tension and generator power, using variance analysis and response procedure method. The results show that the mutual impacts of parameters have the greatest impact on dimensional accuracy.

The optimal value of the parameters and the corresponding dimensional accuracy were extracted based on the response procedure method. Therefore, for the tension values of 1.3485 kg, wire speed of 10 cm/s and power of 46.7677%, the accuracy value reaches its maximum value. For validating the results of the model, these values were tested, which had a 0.2% error compared to the predicted value.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ،۳۵، ۱۴۰۲. (۹۷-۱۰۶)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

بهینه‌سازی دقت ابعادی فولادِ قالب در فرایند وایرکات مبتنی بر روش سطح پاسخ

مقاله پژوهشی

مسعود صیدی[۱]　　فرشاد ربیعی[۲]　　زهرا صیدی[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80447.1154

چکیده *یکی از قطعات صنعتی که نیازمند دقت ساخت بسیار بالایی می‌باشد قالب‌های صنعتی و خصوصاً قالب‌های برش می‌باشد. در این قالب‌ها میزان لقی سنبه و ماتریس برابر ۰,۱ ضخامت ورق است از این رو دقت ساخت این قالب‌ها بسیار دارای اهمیت می‌باشد. امروزه از فرایند وایرکات در ساخت این قالب‌ها به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرایند، بدلیل عدم تماس ابزار با قطعه‌کار، تنش‌های مکانیکی وجود ندارد و قطعات تولیدی دارای دقت بالایی هستند. با این وجود، جهت دستیابی به دقت بالای مورد نیاز در ساخت قالب‌های برش، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از روش رویه پاسخ، مقدار دقت ابعادی بر اساس سه پارامتر سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور برای قطعه‌کار فولادی Mo40 مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این روش، در ابتدا میزان اهمیت هر یک از پارامترها بر دقت ابعادی بر اساس آنالیز واریانس مشخص گردید. سپس با استخراج معادله منطبق بر تست‌های انجام شده، مقدار بهینه دقت ابعادی بر اساس پارامترهای مذکور استخراج گردید. نتایج نشان داد که به ازای مقادیر کشش۱,۳۴۸۵ کیلوگرم، سرعت سیم۱۰ سانتیمتر بر ثانیه و توان ۴۶,۷۶۷۷ درصد مقدار دقت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در نهایت این مقادیر به صورت تجربی مورد تست قرار گرفت و مقدار ۰,۲ درصد خطا نسبت به مقدار پیش‌بینی‌شده ثبت گردید. از این رو می‌توان با استفاده از روش رویه پاسخ، مقدار دقت ابعادی را در فرایند وایرکات قالب‌های صنعتی فولادی پیش بینی و بهینه سازی کرد.*

واژه‌های کلیدی وایرکات، سرعت تزریق سیم، کشش سیم، توان ژنراتور، روش سطح پاسخ، دقت ابعادی، بهینه‌سازی.

Optimization of Dimensional Accuracy of Mold Steel in Wire Cut Process Based on Response Surface Method

Masoud Seidi　　Farshad Rabiei　　Zahra Seydi

Abstract *One of the industrial parts that requires very high manufacturing accuracy is industrial molds and especially cutting molds. In these molds, the clearance of the dies is equal to 0.1 of the thickness of the sheet, so the accuracy of making these molds is very important. Today, the wirecut process is widely used in making these molds. In the process, due to the lack of contact between the tool and the work piece, there is no mechanical tension and the produced parts have high precision. Nevertheless, in order to achieve the high precision required in the production of cutting molds, various methods are used. In this research, using the response surface method, the dimensional accuracy value has been investigated based on three parameters of wire speed, wire tension and generator power for Mo40 steel workpiece. Based on this method, at first, the importance of each parameter on dimensional accuracy was determined by analysis of variance. Then, by deriving the equation according to the conducted tests, the optimal value of dimensional accuracy was extracted based on the mentioned parameters. The results showed that for tension values of 1.3485 kg, wire speed of 10 cm/s and power of 46.7677%, the accuracy value reaches its maximum value. Finally, these values were experimentally tested and a 0.2 % error was recorded. Therefore, by using the method of the response procedure, the amount of dimensional accuracy can be predict and optimize in the wirecut process of industrial steel molds.*

Key Words Wire Cut, Wire Feed Speed, Wire Tension, Generator Power, ،Response Surface Method, Dimensional Accuracy, Optimizatio.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۲۵می‌باشد.

Email: M.seidi@ilam.ac.ir

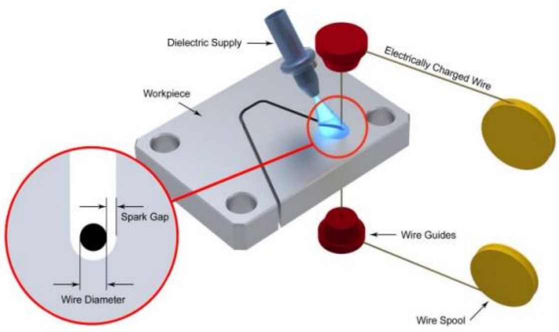
(۱) استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

(۲) استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

(۳) کارشناس ارشد، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

مقدمه

فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیم (WEDM) یک فرایند الکتروترمال است که از یک سیم رسانا با قطر ۰٫۰۵ تا ۰٫۳۰ میلی‌متر به عنوان الکترود استفاده می‌کند. مایع دی‌الکتریک به منظور ایجاد یک شکاف ثابت۱۰۰ –۱۰ میکرومتر، بین الکترود سیمی و قطعه‌کار قرارگرفته است [1]. زمانی که ولتاژ کافی اعمال می‌شود مایع دی‌الکتریک به‌عنوان یک محیط یونیزه‌کننده برای الکترود عمل می‌کند. قطعه‌کار در اثر جرقه‌های مجزا که بین قطعه‌کار و سیم اتفاق می‌افتد، فرسایش یافته و به وسیله جریان سیال دی‌الکتریک، از منطقه ماشین‌کاری دفع می‌گردد [2,3]. شماتیک فرایند وایرکات در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ شماتیک فرایند وایرکات [4]

یکی از مزایای این فرآیند عدم برخوردِ سیم در طول فرآیند با قطعه‌کار است، بنابراین فشار فیزیکی مشابه فرایندهای سنگ‌زنی و فرز بر روی قطعه‌کار وارد نمی‌شود از این رو این فرآیند تنش‌های مکانیکی، صدا و لرزش را در حین ماشین‌کاری حذف کرده و می‌تواند مواد مختلفی را با ضخامت ۳۰۰ میلی‌متر تولید کند [5-7]. وایرکات به دلیل داشتن دقت ابعادی بالا و کیفیت سطحی مطلوب گزینه‌ای مناسب برای ساخت قالب‌ها و قطعات صنعتی می‌باشد. دقت ابعادی مناسب منجر به بهبود استحکام خستگی، مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر خوردگی می‌شود بنابراین هرگونه تلاش برای بهبود دقت ابعادی در این فرایند می‌تواند گامی بزرگ در جهت تولید قطعات دقیق و مستحکم صنعتی باشد [8-11].

تحقیقات متعددی برای افزایش دقت ابعادی قطعات تولید شده با استفاده از فرایند وایرکات، انجام شده است. هارش نیر و همکاران اثر تغییر پارامترهای مختلف را بر دقت ابعادی، نرخ حذف مواد، عرض کرف و زبری سطح قطعه‌کار اینکونل ۷۱۸، با ا ستفاده از فرایند وایرکات برر سی کردند. پارامترهای ورودی در این پژوهش سرعت سیم، کشش سیم و نرخ فلاشینگ بود. نتایج نشان داد دقت ابعادی سوراخ‌های ماشین‌کاری شده با افزایش کشش سیم کاهش می‌یابد [12].

زهور و همکاران دقت ابعادی و زبری سطح فرایند وایرکات در آلیاژ اینکونل ۷۱۸، را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کردند. در این مطالعه کشش سیم، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و تغذیه سیم به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. نتایج نشان داد دقت ابعادی به زمان روشنی پالس، ولتاژ سروو و تغذیه‌ی سیم وابسته است [13].

مانجوناتا و راویندرا آزمایش‌هایی برای ماشین‌کاری به روش وایرکات، در قطعه‌کارهای SKD11/D2A2، کاربید تنگستن و مواد فولادی ملایم با استفاده از سیم برنجی با قطر ۰٫۲۵ میلی‌متر انجام دادند. پارامترهای ورودی در طول آزمایش شامل ولتاژ سروو، فاصله افست، سرعت ماشین‌کاری، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بود. داده‌ها برای ضخامت‌های مختلف و برای مواد مختلف با ضخامت یکسان استخراج و دقت ابعادی و زبری سطح مربوطه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد دقت ابعادی به دلیل افزایش ولتاژ سروو و تعداد پاس‌ها افزایش یافته است [14].

سی و همکاران به بهبود دقت ابعادی و کاهش زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده به روش وایرکات پرداختند. آنها دریافتند با استفاده از روش تاگوچی در این فرایند، می‌توان قطعاتی با دقت ابعادی بالا و با ابعاد متوسط ۰٫۶۶۰۱ اینچ تولید کرد، در حالی که بعد مورد نظر ۰٫۶۶۰۰ اینچ گزارش شد [4].

کانلایاسیری و جاتاکول دقت ابعادی و زبری سطح را با استفاده از تابع مطلوبیت بهینه‌سازی کردند. سرعت برش، جریان پیک و فاصله افست متغیرهای ورودی در این مطالعه بودند. آنها تأثیر معنادار جریان پیک و فاصله افست را بر دقت ابعادی گزارش دادند. همچنین عدم وابستگی دقت ابعادی به سرعت برش، تأیید شد [15].

آدستا و همکاران دقت ابعادی فولاد ضدزنگ را در فرایند وایرکات بررسی کردند. آنها از هوای فشرده به عنوان سیال دی-الکتریک و از الکترود با جنس تنگستن، برای انجام فرایند استفاده کردند. دقت ابعادی از طریق اختلاف عرض دهانه شکاف‌های

ماشین‌کاری شده تعیین شد. تحلیل واریانس نشان داد ولتاژ شکاف و کشش سیم اثر زیادی بر دقت ابعادی دارند، دلیل این امر تأثیر پارامترهای ذکر شده بر ارتعاش سیم در طول عملیات ماشین‌کاری گزارش شد [16].

چوداری و همکاران تأثیر تغییر پارامترهای ورودی بر بهینه-سازی دقت ابعادی در ساخت چرخ‌دنده‌های مینیاتوری به روش وایرکات را بررسی کردند. یک مدل ریاضی با استفاده از روش تاگوچی استخراج شد. تحلیل تاپسیس و واریانس نشان داد زمان روشنی پالس قابل توجه‌ترین پارامتر برای دقت ابعادی خوب است. پارامترهای سیال دی‌الکتریک، جریان، زمان خاموشی پالس و کشش سیم به ترتیب سایر عوامل موثر بر دقت ابعادی در ساخت چرخ‌دنده‌های مینیاتوری گزارش شدند [17].

چاکرابورتی وهمکاران به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر دقت ابعادی گوشه‌ها و زبری سطح، فرایند وایرکات دارای دی-الکتریک ترکیب شده با پودر پرداختند. تجزیه و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش بیانگر تأثیر قابل توجه غلظت پودر بر دقت در گوشه‌ها و زبری سطح می‌باشد. سایر عوامل موثر در این تحقیق، به ترتیب زمان روشنی پالس و حداکثر جریان گزارش شد [18].

آبیار و همکاران تأثیر فرکانس تخلیه، ولتاژ متوسط گپ و سرعت پیشروی را بر دقت در گوشه‌ها مورد بررسی قراردادند. بهینه‌سازی پارامترها توانست میزان خطا را ۱۲٪ کاهش دهد. همچنین نتایج مشخص کرد که مرحله خشن‌کاری موثرترین قسمت برش است و خطاهای ابعادی بیشتر ناشی از مرحله خشن‌کاری است [19].

اسلام و همکاران تأثیر شش پارامتر ورودی فرایند وایرکات را بر خطاهای ابعادی خطی، خطاهای صافی، و خطاهای عمودی سطوح گوشه مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند کشش سیم بیشترین تأثیر را بر میزان دقت ابعادی در سه بعد دارد [20].

سوداکارا و همکاران با استفاده از روش تاگوچی به بهینه‌سازی انحراف ابعادی برحسب پارامترهای ورودی در فرایند وایرکات پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، فشار دی‌الکتریک و جریان پیک تأثیرگزارترین عوامل بر میزان دقت ابعادی در این فرایند هستند [21].

شارما و همکاران تأثیر پارامترهای ورودی را بر دقت ابعادی و سرعت برش در فرایند وایرکات بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی به روش سطح پاسخ تأثیر چشمگیر زمان روشنی پالس و ولتاژ سروو را بر انحراف ابعادی تایید کرد [22].

آریا و سینگ به بهینه‌سازی پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، جریان اوج و ولتاژ سروو ر انحراف ابعادی و نرخ برش در فرایند وایرکات پرداختند. نتایج تحلیل واریانس در این پژوهش نشان داد زمان روشنی پالس تأثیرگزارترین پارامتر بر انحراف ابعادی است [23].

قاسم‌پور و همکاران با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA)، سعی کردند انحراف هندسی قطعات تولید شده توسط وایرکات را به حداقل برسانند. پارامترهای ورودی در این مطالعه شامل سرعت سیم، زمان پالس و نرخ تغذیه بود. این مطالعه دیدگاه جدیدی برای بهینه‌سازی دقت ابعادی در فرایند وایرکات ارائه کرد [24].

گارگ و شارما با استفاده از روش رویه پاسخ و تحلیل واریانس به بهینه‌سازی دقت ابعادی در فرایند وایرکات پرداختند. آنها گزارش دادند با افزایش زمان روشنی پالس و جریان پیک، انرژی تخلیه شدید برای مدت زمان طولانی‌تری به قطعه‌کار برخورد می‌کند. این مورد فشار و نیروهای رانش بیشتری بر روی سیم وارد می‌کند که باعث افزایش انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی شده آن و در نتیجه افزایش انحراف ابعادی می‌شود [25].

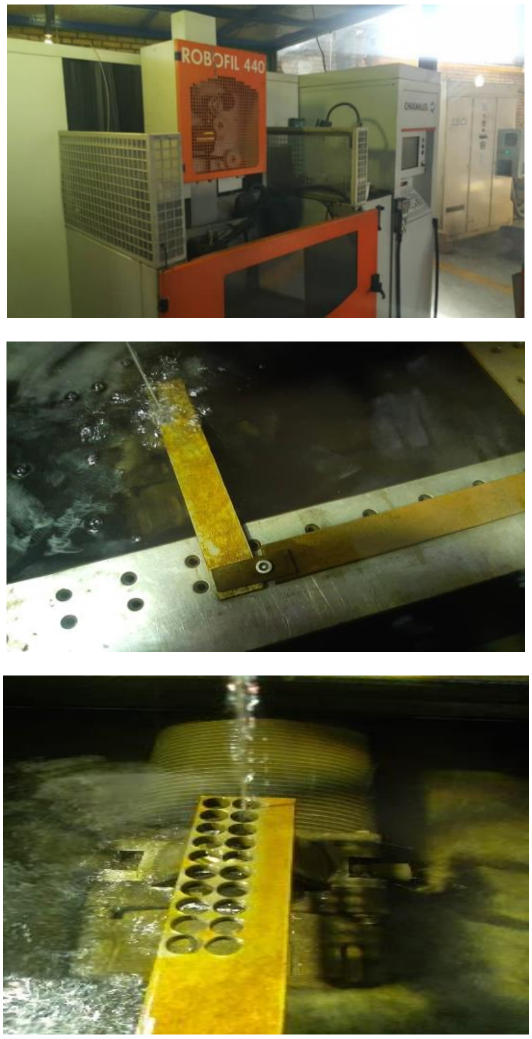
از آنجا که کلیرانس و تلرانس‌های ابعادی از پارامترهای بسیار مهم برای عملکرد صحیح قالب در تولید قطعه‌ای دقیق محسوب می‌شوند، لذا تولید قالبی که قرار است دقت ابعادی بالایی داشته باشد نیاز به ماشین‌کاری با دقت بالا دارد، همین امر سبب کاربرد وسیع وایرکات در صنایع قالب‌سازی شده است. عملکرد ماشین وایرکات کاملاً به پارامترهای ماشین‌کاری وابسته است. به دست آوردن رابطه میان پارامترهای ماشین‌کاری و خصوصیات ماشین‌کاری در فرآیند وایرکات به دلیل تعدد پارامترهای فرآیندی کاری بسیار دشوار است. بنابراین انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری مناسب می‌تواند فرایند را به سمت دقت ابعادی مطلوب سوق دهد. روش رویه پاسخ از جمله تکنیک‌های ریاضی

و آماری می‌باشد که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، استفاده می‌گردد و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ است. این روش می‌تواند نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر ارائه دهد [26-29]. در این تحقیق تلاش شده تا دقت ابعادی که نقشی اساسی در تعیین جایگاه فرایند وایرکات دارد، با استفاده از روش رویه پاسخ بهینه‌سازی شود. سه پارامتر سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور به عنوان پارامترهای ورودی در این فرایند انتخاب شدند.

شرایط آزمایشگاهی

یکی از اصلی‌ترین فولادهای مورد استفاده در ساخت قالب‌ها، فولاد کم‌آلیاژ مولیبدنی Mo40 است که در استاندارد AISI به آن فولاد ۴۱۴۰ گفته می‌شود. این آلیاژ به دلیل وجود کروم ترد و شکننده است. برای حذف تردی به آن حدود ۰٫۲ درصد نیکل اضافه می‌شود. نکته قابل‌توجه در این فولادها مقاومت آن‌ها تا حرارت ۵۰۰–۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. کربن، کرم، منگنر، مولیبدن و سیلسیم عناصر آلیاژی مورد استفاده در این فولادها می‌باشند. این فولادها دارای نسبت استحکام به وزن بالایی می‌باشند، زیرا عملیات آستینه کردن و بعد کوئنچ و سپس تمپر کردن روی آن‌ها انجام می‌شود. در این پژوهش از فولاد Mo40 به عنوان ماده قطعه‌کار استفاده شد. ابتدا جهت یکنواختی در ضخامت با استفاده از دستگاه صفحه تراش، قطعه کار کاملاً کف‌تراشی شد و به ابعاد نهایی ۳۲۰ در ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر رسانده شد. سپس بر روی دستگاه وایرکات پنج محور CHARMILLES شکل (۲) تثبیت شد. سه پارامتر سرعت تزریق سیم، کشش سیم و توان ژنراتور به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شد. محدوده این پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده است.

سرعت سیم و کشش سیم هر دو از پارامترهای کنترل حرکت سیم می‌باشند. سرعت تغذیه سیم نشان دهنده طولی از سیم است که در واحد زمان از قرقره باز می‌شود. افزایش غیرضروری این پارامتر موجب افزایش سیم مصرفی می‌شود از طرفی پایین بودن بیش از حد آن منجر به افزایش احتمال پارگی سیم خواهد شد.



شکل ۲ دستگاه وایرکات پنج محوره و قید و بند قطعه‌کار بر روی آن

جدول ۱ شرایط انجام آزمایش

قطر سیم (میلیمتر)	۰٫۲
جنس سیم	مس
سیال دی الکتریک	آب مقطر
سرعت تزریق سیم (سانتیمتر بر ثانیه)	۲–۱۰
کشش سیم (کیلوگرم)	۰٫۵–۲٫۵
توان ژنراتور (درصد)	۱۰–۵۰

با توجه به لقی‌های موجود در مسیر حرکت سیم، انتخاب مقدار مناسب برای این پارامتر در کاهش ارتعاشات سیم بسیار موثر است. کشش سیم نیز نیرویی طولی است که از طرف ماشین به سیم اعمال می‌شود تا آن را به صورت یک خط مستقیم نگه دارد. به دلیل وجود نیروهای فرآیندی و انعطاف پذیری سیم همواره امکان انحراف و خیز سیم وجود دارد که به وسیله

این پارامتر می‌توان تأثیر آن را کاهش داد. اگر کشش مناسب روی سیم اعمال شود انحراف از مسیر، ارتعاش و تغییرشکل بطور موثری کاهش یافته و در نتیجه خطای ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. برای ایجاد دقت ماشین‌کاری پایدار یک مقدار مشخصی از کشش در سیم برای محدود کردن انحراف مسیر، خمش وارتعاش الزامی است. در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی پارامترهای ذکر شده با استفاده از روش رویه پاسخ، ۲۰ آزمایش مطابق با جدول (۲) انجام شد. برای هر تست، یک استوانه به قطر قاعده ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر از قطعه‌کار برش‌کاری شد.

در جدول (۲) بر اساس روش رویه پاسخ، یک طرح آزمایش تهیه شده است. روش رویه پاسخ، به عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش، در حقیقت یک نوع مدل‌سازی محسوب می‌شود که به دنبال ارایه مدلی جهت برقراری رابطه بین متغیر پاسخ و فاکتورها می‌باشد. به عبارت دیگر رویه پاسخ، متشکل از ابزارهای آماری است. هدف در طرح‌های رویه پاسخ، بهینه‌سازی متغیر پاسخ، که تحت تأثیر فاکتورها می‌باشد، با انجام کمترین تعداد آزمایش است. در روش رویه پاسخ تلاش بر این است که با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین اثرات متقابل، اثرات درجه دوّم و حتی شکل موضعی رویه پاسخ مورد بررسی قرار گیرد. یک آزمایش یک سری از آزمون‌هاست که اجرا نامیده می‌شود که ترتیب استاندارد و ترتیب اجرا در ستون‌های جدول (۲) نشان داده شده‌است. در هر آزمایش تغییرات در فاکتورها به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند. همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ آزمایشات بر اساس سطح پاسخ

ترتیب استاندارد	ترتیب اجرا	کشش (کیلوگرم)	سرعت (سانتیمتر بر ثانیه)	توان (درصد)	مقدار اندازه گیری شده قطر دایره ۱۰ میلیمتری	میزان خطا از دایره ۱۰ میلیمتری (میکرومتر)
6	1	2/5	2	50	9/914	۷۶
1	2	0/5	2	10	9/965	۳۵
20	3	1/5	6	30	9/983	۱۷
4	4	2/5	10	10	9/983	۱۷
12	5	1/5	10	30	9/987	۱۳
19	6	1/5	6	30	9/983	۱۷
۱۷	30	1/5	6	30	9/983	۱۷
7	8	2/5	10	50	9/993	۷
9	9	0/5	6	30	9/975	۲۵
11	10	1/5	2	30	9/994	۶
2	11	2/5	2	10	9/963	۳۷
10	12	2/5	6	30	9/976	۲۴
14	13	1/5	6	50	9/982	۱۸
15	14	1/5	6	30	9/991	۹
8	15	2/5	10	50	9/993	۷
5	16	0/5	2	50	9/973	۲۷
18	17	1/5	6	30	9/984	۱۶
3	18	0/5	10	10	9/964	۳۶
16	19	1/5	6	30	9/987	۱۳
13	20	1/5	6	10	9/974	۲۶

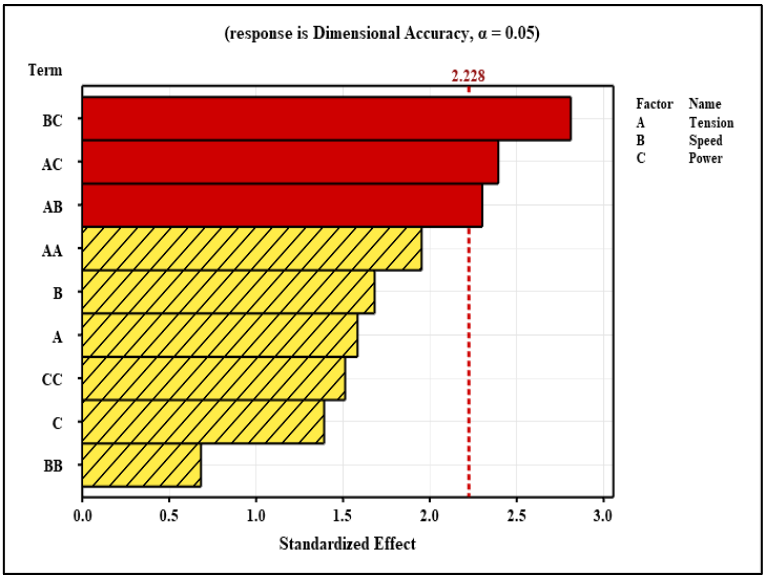
در این تحقیق، سه فاکتور: ۱. کشش، ۲. سرعت و ۳. توان به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند و دقّت ابعادی به

عنوان متغیر پاسخ آورده شده است. ساخت مدل‌های رویه پاسخ در طرح‌های رویه پاسخ، یک فرایند تکراری می‌باشد. به محض اینکه یک مدل تقریبی به دست آمد، (جدول ۳ مشاهده شود) توسط روش نیکویی برازش، مورد آزمون قرار می‌گیرد که آیا جواب رضایت‌بخش است یا خیر، اگر جواب تأیید نشود تخمین فرایند دوباره شروع می‌شود و آزمایش‌های بیشتری انجام می‌شود. نتایج مربوطه در قالب جدول آنالیز واریانس در جدول (۳) آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، P-value اثرات متقابل بین فاکتورها کمتر از ۰٫۰۵ هستند و شایستگی مدل هم مورد تأیید هست.

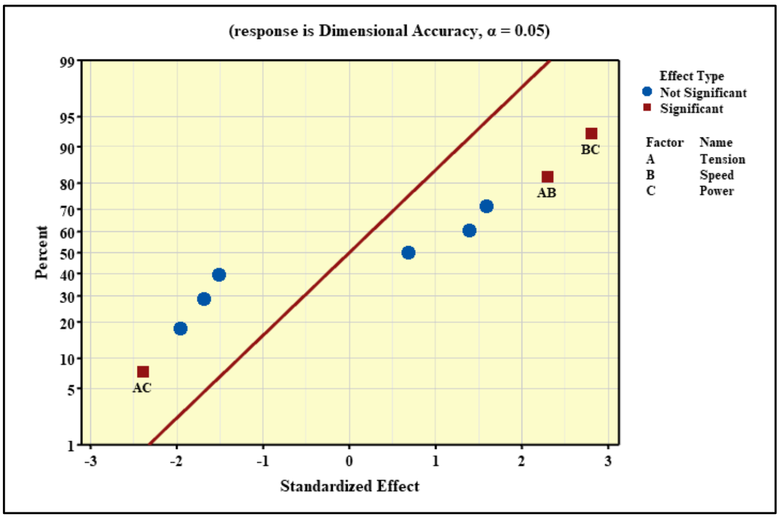
در شـکل (۳) نمودار پارتو مربوط به میزان اثرگذاری اثرات پارامترهای ا صلی، متقابل و مربع بر روی پارامتر خروجی (دقت ابعادی) نشان داده شدها ست. بر ا ساس این نمودار، با ضریب اطمینان ۰٫۹۵، اثرات متقابل فاکتورها دارای بیشـترین اثرگذاری می‌باشند؛ BC: اثر متقابل سرعت و توان، AC: اثر متقابل کشش و توان و AB: اثر متقابل کشـش و سـرعت. در این نمودار، هر میله ای که از خط عمودی ۲٫۲۲۸ عبور کند بیانگر آن ست که بر متغیر پا سخ تأثیر گذار می با شد. عدد مذکور بر ا ساس ضریب اطمینان ۹۵ در صد محا سبه شده ا ست. در حقیقت نمودار پارتو به دنبال آن اسـت عواملی را که مجموع میزان تأثیر آنها بر متغیر پاسخ بیشتر از ۸۰ درصد تأثیرات را تشکیل می دهد را مشخص کند. به عبارت دیگر به دنبال تعیین ۲۰ درصـد از عامل هایی است که سهم آنها در تغییرات متغیر پاسخ برابر ۸۰ درصد است که در این تحقیق این عوامل عبارتند از : اثر متقابل سـرعت و توان،: اثر متقابل کشش و توان و اثر متقابل کشش و سرعت.

جدول ۳ آنالیز واریانس

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.005049	0.000561	6.44	0.004
Linear	3	0.000567	0.000189	2.17	0.155
Tension	1	0.000219	0.000219	2.51	0.144
Speed	1	0.000246	0.000246	2.83	0.124
Power	1	0.000169	0.000169	1.94	0.194
Square	3	0.000991	0.000330	3.79	0.047
Tension*Tension	1	0.000332	0.000332	3.81	0.079
Speed*Speed	1	0.000041	0.000041	0.47	0.509
Power*Power	1	0.000199	0.000199	2.29	0.161
Way Interaction	3	0.002449	0.000816	9.37	0.003
Tension*Speed	1	0.000461	0.000461	5.29	0.044
Tension*Power	1	0.000499	0.000499	5.73	0.038
Speed*Power	1	0.000688	0.000688	7.90	0.018
Error	10	0.000871	0.000087		
Lack-of-Fit	4	0.000818	0.000205	23.24	0.001
Pure Error	6	0.000053	0.000009		
Total	19	0.005921			
Dimensional Accuracy =		9.9607 + 0.0294 Tension – 0.007 Speed + 0.001 Power - 0.01 Tension*Tension + 0.0002 Speed*Speed - 0.0002 Power*Power + 0.0023 Tension*Speed -0.00049 Tension*Power + 0.00014 Speed*Power			



شکل ۳ پارتو تأثیرات استاندارد



شکل ۴ نرمال تأثیرات استاندارد

در شکل (۴)، نمودار نرمال تأثیرات نشان داده شده است، عوامل مؤثر با نماد (■) و عوامل غیرمؤثر با نماد (●)، نشان داده شده است. در این نمودار، ضریب اطمینان برابر ۰٫۹۵ است. در واقع نمودارهای ۳ و ۴ نشان می‌دهند که پارامترهای انتخاب شده در تحقیق بر روی دقت ابعادی اثرگذار هستند و از این رو بررسی و تحلیل آن‌ها جهت دستیابی به مقدار بهینه قابل توجیه است. این نمودار در حقیقت، بیان گرافیکی از آنالیز واریانس می باشد. در این نمودار مقادیر نرمالایز شده ی میزان تأثیرات به تصویر کشیده شده است و آنهایی که بیشترین تأثیر را داشته اند مشخص می کند.

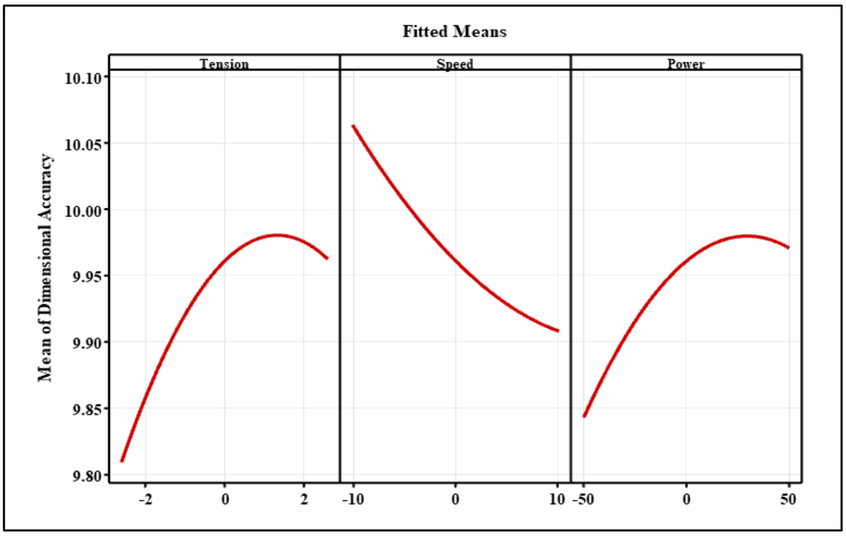
در شکل‌های (۵) و (۶)، تغییرات میانگین دقّت ابعادی با توجّه به سه فاکتور کشش، سرعت، توان و اثرات متقابل نشان داده شده است. این نمودارها تأیید دیگری از پارامترهای مؤثر بر دقت ابعادی و میزان اثرگذاری آنها می‌باشند. درشکل۵، در قسمت چپ نمودار تغییرات میانگین دقت ابعادی بر اساس تغییر در میزان کشش به تصویر کشیده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار متغیر پاسخ به ازای تغییر مقدار کشش به صورت یک تابع مقعر می باشد. در قسمت میانی نمودار تغییرات متغیر پاسخ بر بازه ی تغییرات عامل سرعت ترسیم شده است که یک تابع نزولی می باشد و در قسمت راست نمودار تغییرات متغیر

پاسخ بر اساس تغییر در مقادیر عامل توان نشان داده شده است که به صورت یک تابع مقعر می باشد.

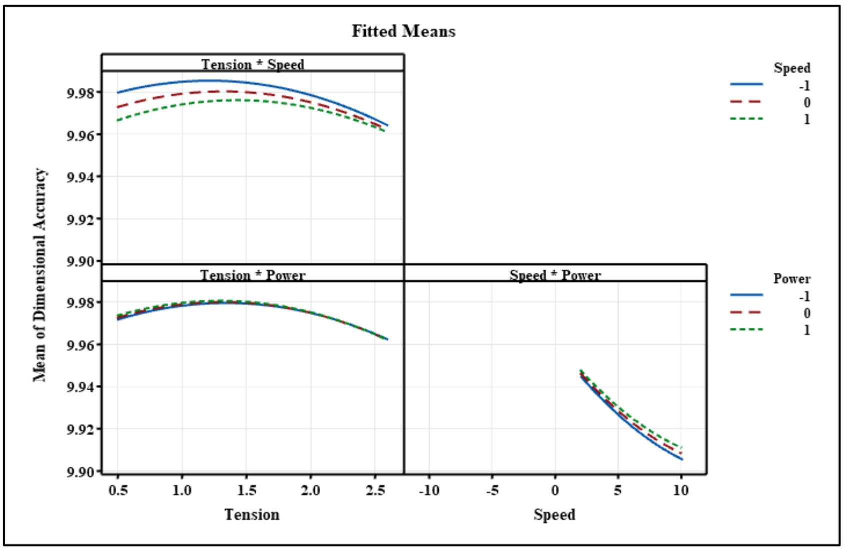
در شکل (۶)، تغییرات در میانگین متغیر پاسخ یعنی میزان دقت ابعادی را بر اساس تغییرات همزمان در دو عامل نشان داده است. کل ترکیبات انتخاب دو عامل از بین سه عامل برابر سه می باشد که به همین جهت شکل (۶) از سه نمودار تشکیل شده است. به عنوان نمونه در نمودار بالای شکل، تغییر مقدار متغیر پاسخ دقت ابعادی بر اساس تغییر همزمان در دو عامل کشش و سرعت نشان داده شده است. محور افقی این نمودار تغییر در مقدار کشش و محور عمودی تغییر در مقدار دقت ابعادی را نشان می دهد. سه نمودار با نمادهای متفاوت بیانگر مقادیر متغیر پاسخ در سه سطح عامل سرعت می باشند.

در شکل (۷)، با استفاده از نرم افزار مینی‌تب، پاسخ بهینه روش رویه پاسخ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای مقادیر کشش=۱,۳۴۸۵، سرعت=۱۰ و توان=۴۶,۷۶۷۷ مقدار دقت ابعادی ۱۰ خواهد شد. در نمودار مقدار d=1 بیانگر شایستگی جواب می‌باشد که حداکثر شایستگی را نشان می‌دهد.

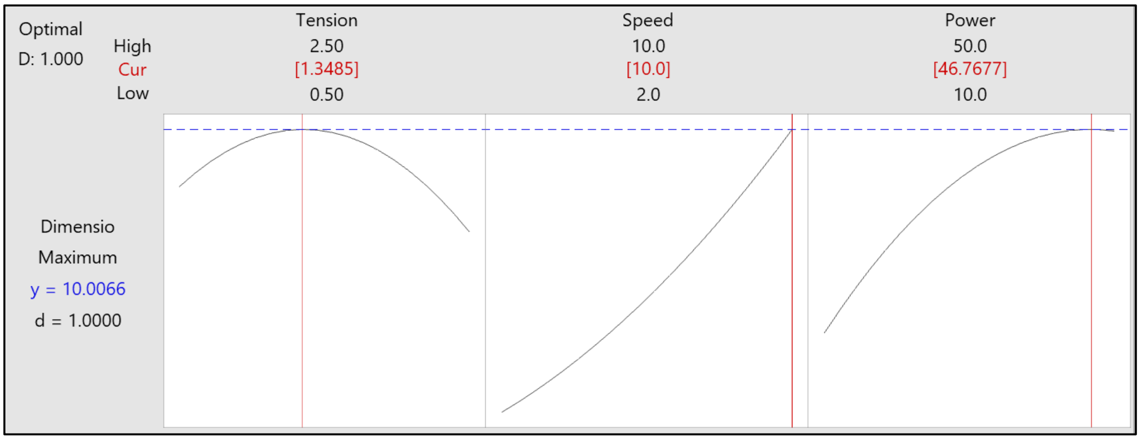
در این شکل می توان با تغییر در میزان عوامل، مقدار متغیر پاسخ را دید. شایان ذکر است که می‌توان مقادیر را غیر از مقادیر سطوح تعریف شده در نظر گرفت.



شکل ۵ اثرات پارامترهای اصلی بر دقّت ابعادی



شکل ۶ اثرات متقابل پارامترها (حاصلضرب پارامترها) بر دقّت ابعادی



شکل ۷ جواب بهینه

نتیجه‌گیری

دستیابی به دقت ابعادی بالا در ساخت قالب‌های برش بسیار حائز اهمیت است. فرایند وایرکات یکی از فرایندهای متداول جهت ساخت این قالب‌ها می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از آنالیز واریانس و روش رویه پاسخ مقدار دقت ابعادی بر اساس پارامترهای سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور تحلیه، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شود. نتایج نشان می‌دهد که اثرات متقابل پارامترها دارای بیشترین تأثیر بر دقت ابعادی هستند. در ادامه بر اساس روش رویه پاسخ، مقدار بهینه پارامترها و دقت ابعادی متناظر استخراج گردید. بر این اساس به ازای مقادیر کشش ۱,۳۴۸۵ کیلوگرم، سرعت سیم ۱۰ سانتیمتر بر ثانیه و توان ۴۶,۷۶۷۷ درصد مقدار دقت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. جهت صحت‌سنجی نتایج مدل، این مقادیر تست گردید که دارای ۰,۲ درصد خطا نسبت به مقدار پیش‌بینی شده بود.

واژه نامه

برش با سیم	Wire Cut
سرعت تغذیه سیم	Wire Feed Speed
کشش سیم	Wire Tension
توان ژنراتور	Generator Power
روش رویه پاسخ	Response Surface Method
دقت ابعادی	Dimensional Accuracy
بهینه سازی	Optimization
فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیم	Wire Cut Electro Discharge Machinibg

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A. Kumar, V. Kumar and J. Kumar, “Multi-response optimization of process parameters based on response surface methodology for pure titanium using WEDM process”, *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, pp. 2645-2668, (2013).

[2] Q. Liu, Q. Zhang, M. Zhang and J. Zhang, “Review of size effects in micro electrical discharge machining”, *Precision Engineering*, vol. 44, pp. 29-40, (2016).

[3] M. Hourmand, A.A. Sarhan and M.Y. Noordin, “Development of new fabrication and measurement techniques of micro-electrodes with high aspect ratio for micro EDM using typical EDM machine”, *Measurement*, vol. 97, pp. 64-

78, (2017).

[4] J.C. Chen and J. Cox, “Taguchi-based optimization of surface roughness and dimensional accuracy in wire EDM process with S7 heat treated steel”, *Materials and Metallurgical Engineering*, vol. 11, no. 8, Pp. 568-573, (2017).

[5] N.M. Abbas, D.G. Solomon and M.F. Bahari, “A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)”, *machine tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 1214-1228, (2007).

[6] A. Banu and M.Y. Ali, “Electrical discharge machining (EDM): a review”, *Engineering Materials and Manufacture*, vol. 1, pp. 3-10, (2016).

[7] R. Chalisgaonkar and J. Kumar, , “Multi-response optimization and modeling of trim cut WEDM operation of commercially pure titanium (CPTi) considering multiple user's preferences”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, pp. 125-134, (2015).

[8] Y.H. Guu and H. Hocheng, “Improvement of fatigue life of electrical discharge machined AISI D2 tool steel by TiN coating”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 318, pp. 155-162, (2001).

[9] S. Jeelani, and M.R. Collins, “Effect of electric discharge machining on the fatigue life of Inconel 718”, *International journal of fatigue*, vol. 10, no. 2, pp. 121-125, (1988).

[10] O.A. Zeid, “On the effect of electrodischarge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel”, *Materials Processing Technology*, vol. 68, pp. 27-32, (1997).

[11] M. Ramulu, G. Paul and J. Patel, “EDM surface effects on the fatigue strength of a 15 vol% SiCp/Al metal matrix composite material”, *Composite structures*, vol. 54, no. 1, pp. 79-86, (2001).

[12] H. Nair, A. Pramanik, A.K. Basak, C. Prakash, S. Debnath, S. Shankar and A.R. Dixit, “Experimental investigation on material removal rate, kerf width, surface roughness and the dimensional accuracy the accuracy of hole in Inconel 718 using wire electric discharge”, *Process Mechanical Engineering*, vol. 1, (2022).

[13] S. Zahoor, H.A. Azam, M.P. Mughal, N. Ahmed, M. Rehman and A. Hussain, “WEDM of complex profile of IN718: multi-objective GA-based optimization of surface roughness, dimensional deviation, and cutting speed”, *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp. 2289-2307, (2021).

[14] B.B. Manjunatha, H.V. Ravindra and N. Kuruvila, “ESTIMATION OF SURFACE ROUGHNESS AND DIMENSIONAL ACCURACY USING PROCESS PARAMETERS IN WIRE CUT EDM BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK”, *International of symposium on measurement and quality control*, vol. 1, (2007).

[15] K. Kanlayasiri and P. Jattakul, “Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDM ed K460 tool steel”, *Precision engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 556-561, (2013).

[16] M.Y. Ali, A. Banu, M. Salehan, E.Y. Adesta, M. Hazza and M. Shaffiq, “Dimensional accuracy in dry micro wire electrical discharge machining”, *Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 3321-3329, (2018).

[17] T. Chaudhary, A.N. Siddiquee, A.K. Chanda, S. Ahmad, I.A. Badruddin and Z.A. Khan, “Multiple Response Optimization of Dimensional Accuracy of Nimonic Alloy Miniature Gear Machined on Wire Edm Using Entropy Topsis Andpareto Anova”, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 126, no. 1, pp. 241-259, (2021).

[18] S. Chakraborty, S. Mitra and D. Bose, "Optimisation of machining performance in PMWEDM of titanium alloy using the hybrid technique (GRA-PCA)", *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 1-14, (2020).

[19] H. Abyar Firouzabadi, J. Parvizian and A. Abdullah, "Improving accuracy of curved corners in wire EDM successive cutting", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, pp. 447-459, (2015).

[20] M.N. Islam, N.H. Rafai and S.S. Subramanian, "An investigation into dimensional accuracy achievable in wire-cut electrical discharge machining", *Proceedings of the world congress on Engineering*, vol. 3, pp. 2476-2481, (2010).

[21] D. Sudhakara and G. Prasanthi, "Optimization of dimensional deviation: wire cut EDM of vanadis-4e (powder metallurgical coldworked tool steel) by Taguchi method", *Proceedings of 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR), IIT Guwahati, Assam*, India, December 12–14, (2014).

[22] N. Sharma, R. Khanna, R.D. Gupta and R. Sharma, "Modeling and multiresponse optimization on WEDM for HSLA by RSM", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, pp. 2269-2281, (2013).

[23] R. Arya and H. Singh, "Optimization of Wire-cut EDM process parameters using TLBO algorithm", *Engineering Research Express*, vol. 4, no. 3, pp. 035051, (2022).

[24] M. Ghasempour-Mouziraji, M. Hosseinzadeh, H. Hajimiri, M. Najafizadeh and E. Marzban Shirkharkolaei, "Machine learning-based optimization of geometrical accuracy in wire cut drilling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 123, no. 11, pp. 4265-4276, (2022).

[25] M.P. Garg, A. Jain and G. Bhushan, "Multi-objective optimization of process parameters in wire electric discharge machining of Ti-6-2-4-2 alloy", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 39, pp. 1465-1476, (2014).

[26] H. Abyar Firouzabadi, A. Abdullah, J. Parvizian and A. Fadai Tehrani, "Investigating the accuracy of machining corners in wirecut and determining the relationship between the error of the corner radius and the thickness of the remaining load", *The 11th conference of manufacturing and production engineering*, Iran, October 19-21, (2010). (In Persian)

[27] H. Rezaei Ashtiani, H. Khoshkish and R. Narimani, "Investigating the dimensional accuracy of the part and tool wear in EDM using different types of tool electrodes", *The 12th annual (international) conference of mechanical engineering*, Iran, May, (2006). (In Persian)

[28] M. Qureshi, V. Tahmasabi, S. Hakak Zargar, "Optimization of machining parameters on surface quality and dimensional accuracy of the hole in micro-drilling process of rice alloy by response surface method", *The 12th conference of manufacturing and production engineering*, Iran, December 29-30, (2011). (In Persian)

[29] H. Rezaei Ashtiani and H. Bisadi, "Investigating the effect of cross-sectional area of spark energy distribution on the dimensional accuracy of electrical discharge machining (EDM)", *The 9th Manufacturing and Production Engineering Conference*, Iran, February, (2010). (In Persian)